ChinaXiv合作期刊

MixSIAR和IsoSource模型对比分析天山北坡不同灌木的夏季水分来源

李红梅[1]， 巴贺贾依娜尔·铁木尔别克[2]， 常顺利[1]，
古丽哈娜提·波拉提别克[1]， 张毓涛[3,4]， 李吉枚[3,4]

（1. 新疆大学生态与环境学院，新疆 乌鲁木齐 830046；2. 新疆大学地理与遥感科学学院，新疆 乌鲁木齐 830046；3. 新疆林业科学院森林生态研究所，新疆 乌鲁木齐 830063；4. 新疆天山森林生态系统国家定位观测研究站，新疆 乌鲁木齐 830063）

chinaXiv:202303.10342v1

摘 要： 本研究旨在为量化植物水分来源选取模型时提供一定参考。结合氢氧稳定同位素技术量化植物水分来源的常用方法主要有MixSIAR模型和IsoSource模型，不同模型的量化结果各不相同，存在差异，择优选取模型对减少结果的不确定性具有重要意义。本文以天山北坡山前灌木带两种优势树种黑果栒子（*Cotoneaster melanocarpus*）和异果小檗（*Berberis heteropoda*）为研究对象，分别于2019年和2021年7—9月测定了植物木质部水和潜在环境水源的稳定氢氧同位素组成，运用MixSIAR和IsoSource模型分别量化植物水分来源，对比分析两种模型的计算结果，根据均方根误差（Root Mean Square Error，RMSE）和参数*R*对模型量化结果进行评价。结果表明：（1）两种模型对植物主要潜在水源的量化结果存在差异，造成差异的原因与两种模型的计算原理不同有关。（2）两模型量化得到植物主要潜在水源一致的前提下，IsoSource模型量化的结果数值大于MixSIAR模型。（3）通过RMSE与参数*R*的结果均表明本研究中IsoSource模型对植物水源量化结果的准确性高于MixSIAR模型，可能与异果小檗和黑果栒子水源差异较大有关，MixSIAR模型可能在量化植物水源相似度较高的情况精确度更高。

关键词： 氢氧稳定同位素；水分来源；MixSIAR模型；IsoSource模型；天山北坡

水分对植物生长至关重要，尤其是干旱区水分更是限制其生长的重要因子[1-3]。稳定同位素技术在植物水源研究中具有较高的准确性、测量方便快捷、对植物破坏性较小等优点[4-5]，已成为研究植物水分来源的重要方法。植物水源定量的方法和模型有很多，包括直接对比法、多元线性混合模型（IsoSource）[6]、二元或三元线性混合模型、贝叶斯混合模型（MixSIR、SIAR、MixSIAR）[7-9]和吸水深度模型[10]等，然而基于各种模型方法的原理不同，致使各种模型量化植物水分来源的结果各不相同，不同的模型方法均有各自的优缺点。然而，目前基于不同模型优缺点的对比研究较少。曾祥明等[11]通过直接相关法衡量了IsoSource和MixSIAR两种模型对西南喀斯特地区植物水分来源量化的适用性，结果表明MixSIAR模型的适用性更高。张宇等[12]对比了直接对比法、多元线性混合模型（IsoSource）、贝叶斯混合模型（MixSIR、MixSIAR）和吸水深度模型量化西北干旱区植物水分来源的优缺点，结果表明贝叶斯混合模型（MixSIR）为最优解。可见，不同地区不同模型量化植物水分来源的结果有所差异。

天山北坡是西北干旱区重要的生态屏障，其在维持区域小气候、涵养水源、水土保持和调节径流等方面发挥着至关重要的作用[13]，目前关于天山北坡森林生态系统植物水分来源的相关研究较少，在研究天山北坡森林生态系统植物水分来源方面，不同模型量化植物水分来源的差异结果如何尚不明

收稿日期： 2022-06-01； **修订日期：** 2022-07-08
基金项目： 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目面上项目（2021D01C056）；新疆维吾尔自治区教育厅人才类项目-天池博士计划（tcbs201918）；新疆大学博士启动基金（BS190206）；自治区林业发展补助资金项目（XJLYKJ-2022-10，XJLYKJ-2021-20）
作者简介： 李红梅（1992-），女，硕士研究生，主要从事天山北坡生态水文过程研究. E-mail: 670846152@qq.com
通讯作者： 常顺利. E-mail: ecocsl@163.com

ChinaXiv合作期刊

确。鉴于此，本文基于稳定同位素技术，选取天山北坡中段两种优势树种黑果栒子(*Cotoneaster melanocarpus*)和异果小檗(*Berberis heteropoda*)，运用IsoSource和MixSIAR模型量化两种灌木在2019年和2021年主要生长季(夏季)的水分来源，对比分析两种模型量化植物水分来源的结果差异，为干旱区植物水分来源模型选择提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域在天山北坡中段，属温带大陆性气候，年平均气温约2.0 ℃，历年极端最高和最低气温分别为30.5 ℃和−30.2 ℃，年降水量在400~800 mm，年蒸发量达1100~2100 mm[14-15]。山前灌木主要有密刺蔷薇(*Rosa spinosissima*)、黑果栒子(*Cotoneaster melanocarpus*)、金丝桃叶绣线菊(*Spiraea hypericifolia*)、异果小檗(*Berberis heteropoda*)等[14,16]。在天山北坡中段(87°07′~87°28′E，43°14′~43°26′N)灌木群落内进行采样，气象数据从采样地点附近的自动气象站获取研究期内的气温、降水相关气象数据。

1.2 研究方法

1.2.1 同位素样品采集 植物于2019年和2021年7—9月在天山北坡山前灌木带采集，以每月1次的频率采集长势良好的4株异果小檗和黑果栒子植株，用果枝剪获取植株栓化小枝，去除外皮，保留木质部，装入采样瓶，用Parafilm膜密封保存，装入冰盒，带回室内冷冻保存(−20 ~ −15 ℃)，用于植物木质部水δ^2H、δ^{18}O值的测定[17]。

土壤在已采集的植物下方用土钻分层(0~100 cm)采样。土壤分层为0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~70 cm、70~100 cm共5层。每层土壤取适量用采样瓶保存Parafilm膜密封，装入冰盒，带回室内冷冻(−20~−15 ℃)储存，用于土壤水δ^2H、δ^{18}O值的测定；同时每层土壤取适量装入铝盒，带回实验室，在尽可能短的时间内采用烘干法测定土壤含水量[18-19]。

在研究期内每次下雨后收集降水，降水通过漏斗进入长颈的收集瓶。将收集瓶内的降水倒入采样瓶，用Parafilm膜密封后冷藏(2~5 ℃)，同时在样品瓶上记录日期，用于降水δ^2H、δ^{18}O值测定。泉水是地下水排泄途径之一，在山地地下水无法获取的情况下采集泉水代替地下水[17,20-21]。在采样地点附近的泉流采集适量泉水，装入样品瓶后用Parafilm膜封口后放入冰盒，带回室内冷藏保存(2~5 ℃)，用于泉水δ^2H、δ^{18}O值测定。

1.2.2 同位素测定 将2019年采集的样品在阜康荒漠生态系统国家野外科学观测研究站使用低温真空抽提法对植物和土壤水进行抽提，使用水同位素分析仪(DLT−100)进行同位素测定。2021年采集的土壤水分和植物木质部水的抽提及样品δ^2H、δ^{18}O值的测定在新疆大学荒漠与绿洲生态国家重点实验室内完成，用LI−2100全自动真空冷凝抽提系统(LI−2100)对植物和土壤水进行抽提，用水同位素分析仪(TIWA−912)进行同位素测定。计算公式如下：

$$\delta X = \left(\frac{R_{sample}}{R_{standard}} - 1 \right) \times 1000‰ \tag{1}$$

式中：X代表样品氢氧同位素组成；R_{sample}和$R_{standard}$分别代表样品氢氧元素重轻同位素丰度之比和国际通用标准物V-SMOW氢氧元素重轻同位素丰度之比。为了减少甲醇、乙醇等有机污染物引起的误差，建立了光谱污染校正公式[22-23]，对植物水的测试δ^2H、δ^{18}O值进行了校正。

1.2.3 植物水分来源的计算与水源的划分 当使用IsoSource模型计算植物水源时，增量设定为1%，Tolerance设定值通常不小于增量与各水源氢氧同位素比值最大差值乘积的一半[6,11]。运用MixSIAR模型时，分别输入植物木质部水δ^2H、δ^{18}O值和不同土层土壤水及泉水的δ^2H、δ^{18}O值，植物木质水δ^2H、δ^{18}O值为混合数据，分土层土壤水和泉水的δ^2H、δ^{18}O值为源数据，按照模型参数进行设置运行即可[7]。根据不同土层土壤水氢氧同位素组成的异同，将土壤垂直剖面(0~100 cm)土层划分为浅层土壤水(0~10 cm)、中层土壤水(10~40 cm)和深层土壤水(40~100 cm)，加泉水共4个潜在水源。

1.2.4 模型评判参数 为了对比模型量化植物水分来源的结果，运用均方根误差和参数R进行评估。

均方根误差(Root Mean Square Error，RMSE)[12,24]计算公式如下：

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i) \right]} \tag{2}$$

式中：n为验证样本的数；O_i和P_i分别为植物木质部水的观测值和预测值[24]。RMSE值越小，说明模

chinaXiv:202303.10342v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.10342v1

型量化植物水分来源结果的误差越小。

将实验测得的植物木质部氢氧同位素组成为观测值(O_i)和预测值(P_i)，计算公式如下[25]：

$$P_i = \sum_{i=1}^{n} f_i \delta_A \tag{3}$$

式中：n是植物潜在水源个数；f_i为MixSIAR或IsoSource模型计算植物对第i个水源的利用比例，δ_A是不同潜在水源的氢氧同位素组成[11]。

参数R[26]的计算公式如下：

$$R = \left(\frac{\delta^2 H_{t,c}}{\delta^2 H_{t,m}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\delta^{18} O_{t,c}}{\delta^{18} O_{t,m}} - 1 \right)^2 \tag{4}$$

式中：下标t指植物木质部水；下标m指同位素混合物的测量值；下标c是通过混合模型计算的值。R值越小表明模型计算的误差越小。

2　结果与分析

2.1　降水及各水源氢氧同位素组成特征分析

天山北坡中段2019年7—9月降雨量为215.8 mm，降水δ^2H值变化范围为−98.7‰~3.8‰，降水δ^{18}O值变化范围为−15.3‰~0.6‰（图1）。整体来看，7月和8月降水δ^2H、δ^{18}O值相对富集，9月相对贫化；2021年7—9月降雨量为126.8 mm，降水δ^2H值变化范围为−67.5‰~5.2‰，降水δ^{18}O值的变化范围为−10.4‰~0.2‰。

由图2可知，分别将2019年和2021年当地大气降水线（LMWL）与全球大气降水线（GMWL：δ^2H=8δ^{18}O+10）[27]相比，2019年和2021年LMWL的斜率均低于GMWL的斜率，表明天山北坡中段降水受一定蒸发作用的影响。2019年和2021年土壤蒸发线（EWL）均落在LMWL右下方。

2.2　土壤含水量及土壤水氢氧同位素组成变化特征

土壤深度和月份均对土壤含水量产生极显著影响（P<0.001）（表1）。由图3可知，天山北坡中段2019年和2021年7—9月土壤垂直剖面上土壤含水量变化显著，主要表现为表层土壤含水量较高，深层较低且趋于稳定的变化趋势；2019年7月各土层土壤含水量较高，2019年8月各土层土壤含水量均较低，2019年9月0~20 cm土层土壤含水量较高，20~100 cm土层土壤含水量较低；而2021年8月0~20 cm土层土壤含水量显著（P<0.05）高于7月和9月，7—9月40~100 cm土层土壤含水量差异不大。

2019年7—9月土壤水δ^{18}O值总体变化范围在−12.2‰~−5.7‰，2021年7—9月土壤水δ^{18}O值总体变化范围在−11.8‰~−5.3‰。可明显看出，天山北

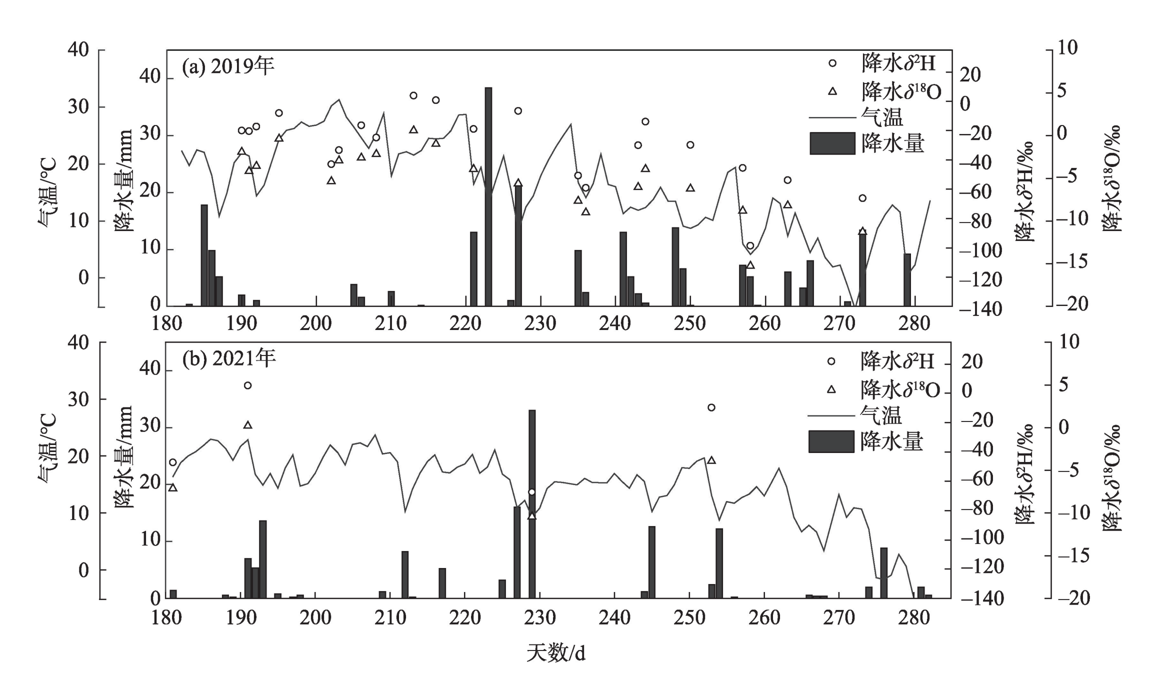
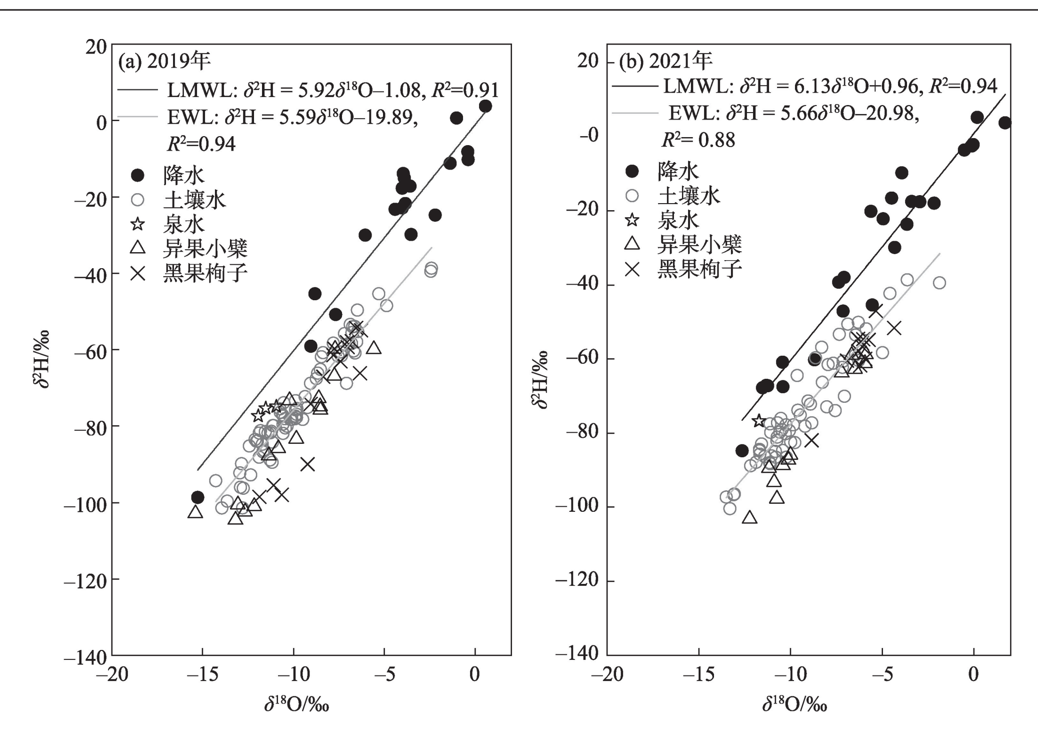


图1　天山北坡中段降水量、气温及降水δ^2H、δ^{18}O值变化

Fig. 1　Changes of temperature, precipitation and δ^2H and δ^{18}O values of precipitation of the middle section of the northern slope of Tianshan Mountain

ChinaXiv合作期刊



注:LMWL表示当地大气降水线;EWL表示土壤蒸发线。

图2 天山北坡中段降水、土壤水和植物木质部水δ^2H、$\delta^{18}O$值之间的关系

Fig. 2 Relationship between the δ^2H and $\delta^{18}O$ of precipitation, soil water and plants xylem water of the middle section of the northern slope of Tianshan Mountain

表1 土壤含水量和土壤水$\delta^{18}O$值的GML单因素方差分析结果

Tab. 1 GML one-way ANOVA results of gravimetric soil water content and soil water $\delta^{18}O$ value

	土壤含水量						土壤水$\delta^{18}O$					
	2019年7—9月			2021年7—9月			2019年7—9月			2021年7—9月		
	df	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*
土壤深度	4	20.48	<0.001	4	12.30	<0.001	4	11.52	<0.001	4	31.93	<0.001
月份	2	18.44	<0.001	2	15.47	<0.001	2	1.01	0.37	2	0.42	0.66
土壤深度×月份	8	3.06	<0.05	8	4.78	<0.001	8	0.31	0.96	8	1.30	0.27

坡中段土壤水$\delta^{18}O$值在0~20 cm土层显著富集且变化较大,在40~100 cm土层土壤水$\delta^{18}O$值趋于稳定且相对0~20 cm土层较为贫化(图4)。土壤垂直剖面(0~100 cm)内各土层土壤水$\delta^{18}O$值月份间无显著性差异(P≥0.05)(图4,表1)。

2.3 植物水分来源定性分析

由图5可知,2019年和2021年7—9月天山北坡中段土壤水$\delta^{18}O$值均在浅层富集,随着土壤深度的增加而趋于贫化,研究期泉水$\delta^{18}O$值与100 cm土层土壤水处$\delta^{18}O$值较为接近。根据图5中异果小檗和黑果枸子木质部水$\delta^{18}O$值的垂线与不同水源$\delta^{18}O$值的交点所处的位置,初步判断异果小檗和黑果枸子的主要潜在水源。研究期黑果枸子木质部水$\delta^{18}O$值均与各水源在10~20 cm土层仅有一个交点(除2019年8月外),表明浅层土壤水是黑果枸子主要的潜在水源;2019年8月黑果枸子木质部水$\delta^{18}O$值与20~40 cm土层土壤水相交,表明此时中层土壤水是黑果枸子主要的潜在水源。异果小檗植物木质部水的$\delta^{18}O$值与黑果枸子相比较为贫化,2019年7月异果小檗植物木质部水$\delta^{18}O$值与20~40 cm土层土壤水相交,表明该阶段中层土壤水是其主要的潜在水源;2019年8月异果小檗木质部水$\delta^{18}O$值与各水源无交点,故无法判断出异果小檗8月的主要潜在水源;2019年9月及2021年7月异果小檗木质部水

chinaXiv:202303.10342v1

ChinaXiv合作期刊

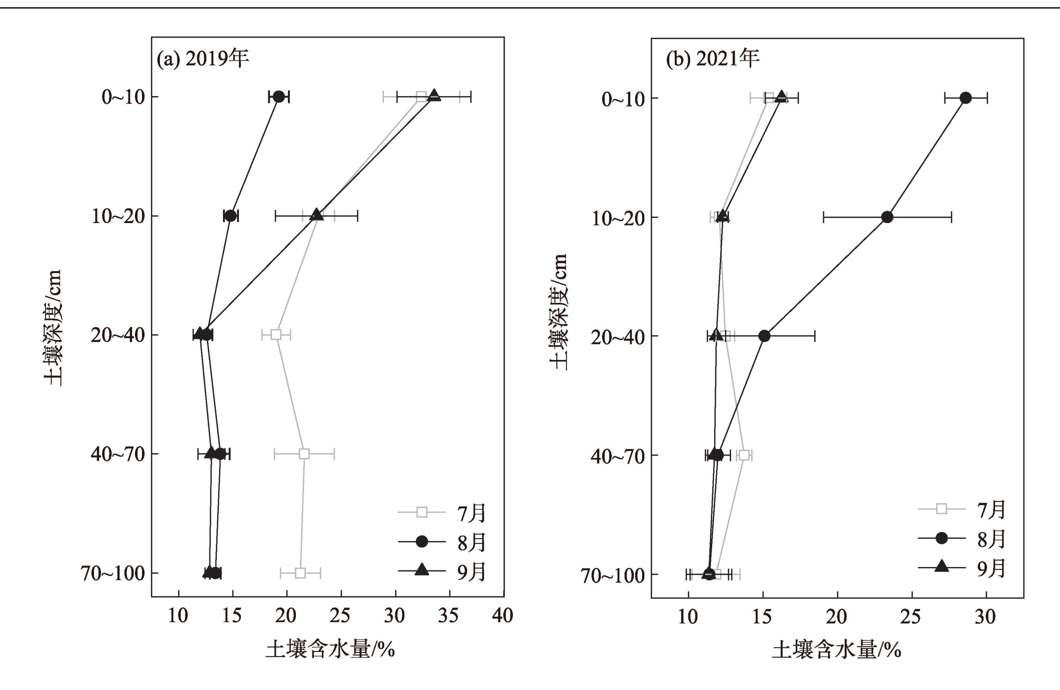


图3　天山北坡中段土壤垂直剖面土壤含水量的变化

Fig. 3　Changes of gravimetric soil water content in vertical section of soil in the study area of the middle section of the northern slope of Tianshan Mountain

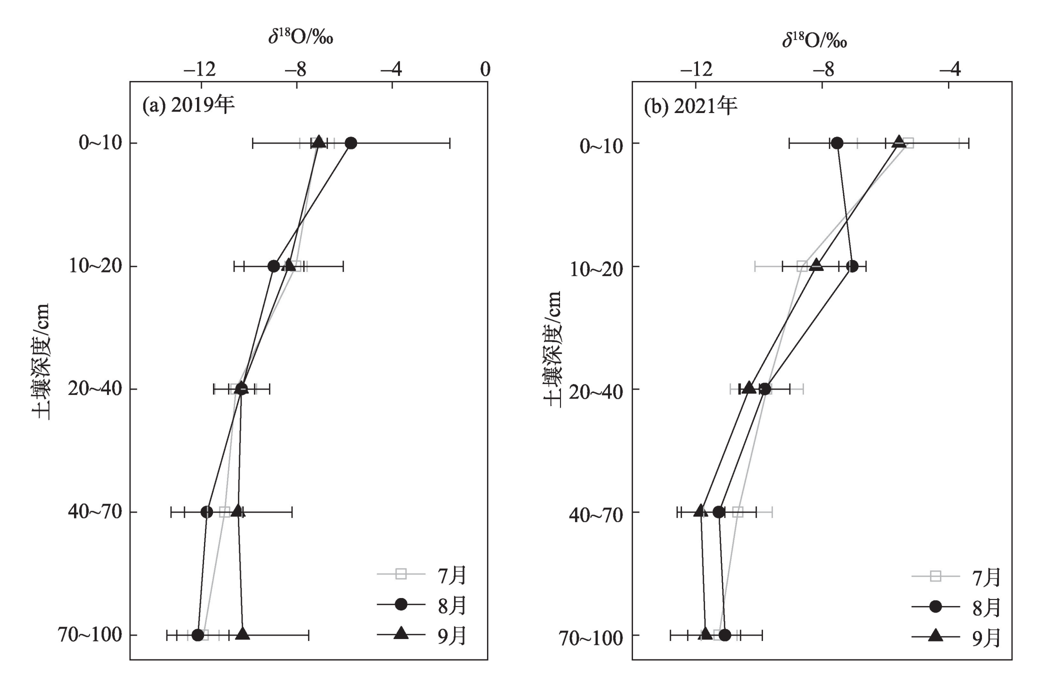


图4　天山北坡中段土壤垂直剖面土壤水$\delta^{18}O$值月平均值变化特征

Fig. 4　Variation characteristics of monthly average value of soil water $\delta^{18}O$ in vertical section of soil of the middle section of the northern slope of Tianshan Mountain

$\delta^{18}O$值与10~20 cm土层土壤水相交,表明此阶段浅层土壤水是异果小檗的主要潜在水源;2021年8月异果小檗植物木质部水$\delta^{18}O$值与40~70 cm土层土壤水相交,且同时与100 cm土层土壤水$\delta^{18}O$值较为接近,表明此阶段深层土壤水是异果小檗的主要潜在水源;2021年9月异果小檗植物木质部水$\delta^{18}O$值与20~40 cm土层土壤水相交,但与20 cm土层土壤水$\delta^{18}O$值较为接近,因此20 cm土层土壤水可能是异果小檗

chinaXiv:202303.10342v1

ChinaXiv合作期刊

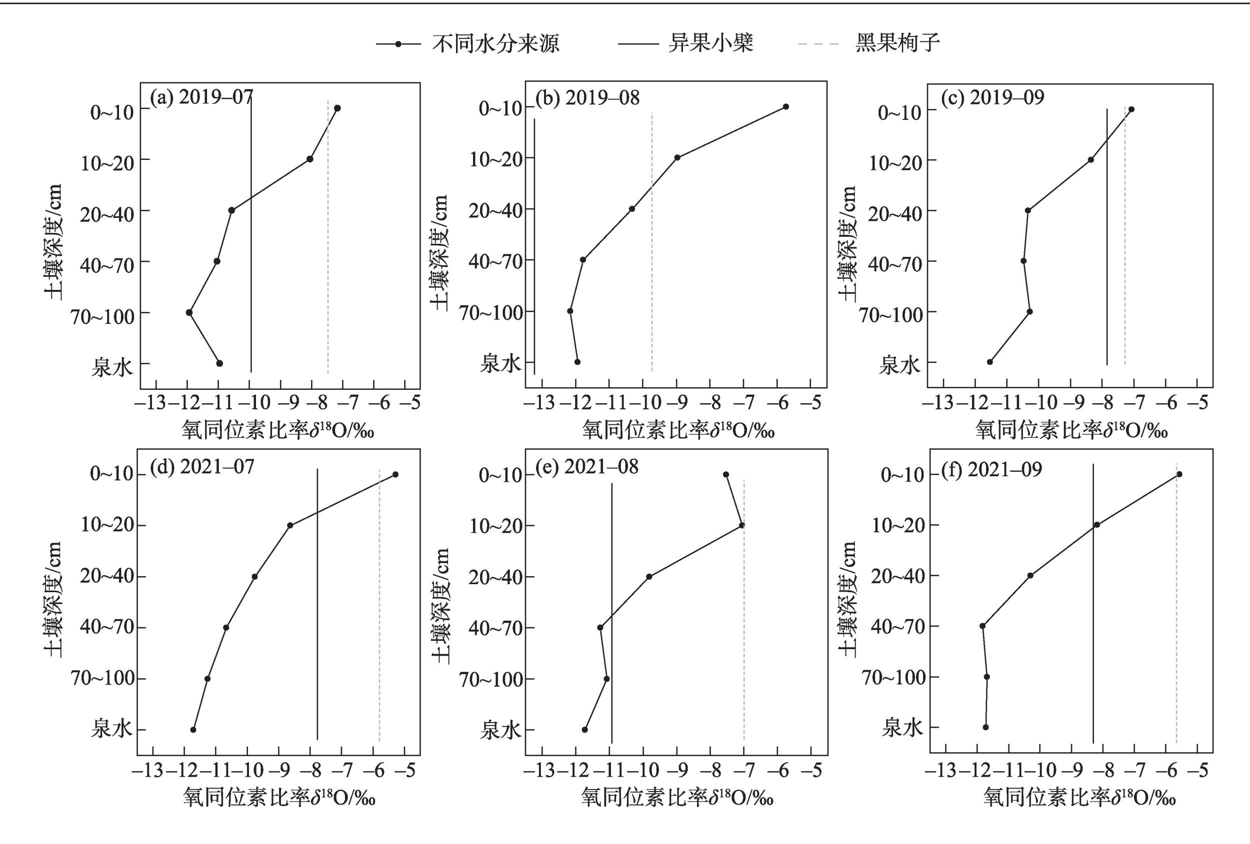


图5 直接对比法的计算结果

Fig. 5 The results of direct comparison

的主要潜在水源。

2.4 MixSIAR和IsoSource模型对植物水分来源量化结果

异果小檗对各土层土壤水均有一定的利用比例，更多的利用中层或深层土壤水(图6)。两种模型对异果小檗水源利用的量化结果在个别月份不一致，如2019年8月IsoSource模型未计算出异果小檗的水源利用结果，而MixSIAR模型计算得到此时异果小檗主要潜在水源层为深层土壤水；2019年9月IsoSource模型计算得到异果小檗的主要潜在水源为浅层土壤水(72.8%±6.6%)，而MixSIAR模型计算得到此时异果小檗对中层和深层水源均有利用，对深层的利用比例(32.7%±8.8%)略大；2021年7月IsoSource模型计算得到异果小檗主要潜在水源为浅层土壤水，而MixSIAR模型计算异果小檗对中层土壤水的利用比例略大于其他土层。其他月份两种模型计算得到异果小檗的主要潜在水源层一致，但IsoSource模型计算的比例略大于MixSIAR模型(除2019年7月)。

由图7可知，研究期黑果枸子对浅层土壤水的利用较多。两种模型量化得到研究期内黑果枸子的主要潜在水源均一致，但IsoSource量化得到黑果枸子对主要潜在水源的利用比例均大于MixSIAR模型(除2019年8月)。

2.5 模型量化结果的对比分析

根据MixSIAR和IsoSource模型量化植物水分利用比例的结果计算得到相应的RMSE和参数R值。由表2可知，IsoSource模型的RMSE值和R值均小于MixSIAR模型，说明IsoSource模型对天山北坡中段植物水源的计算误差小于MixSIAR模型。

3 讨 论

3.1 两种植物水分利用关系的比较

通过分析MixSIAR和IsoSource模型的计算结果，黑果枸子在研究期对浅层土壤水的相对利用比例较大，而异果小檗则对各土层水源均产生了一定的利用比例，对中层和深层土壤水的利用比例较大(图6，图7)。说明异果小檗和黑果枸子在水分资源的利用过程中水源彼此不重合，两种植物水分来源差异较大，种间竞争较小，由此可推测二者可能具有不同的根系特征，能够在垂直方向上分割其水分

chinaXiv:202303.10342v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202303.10342v1

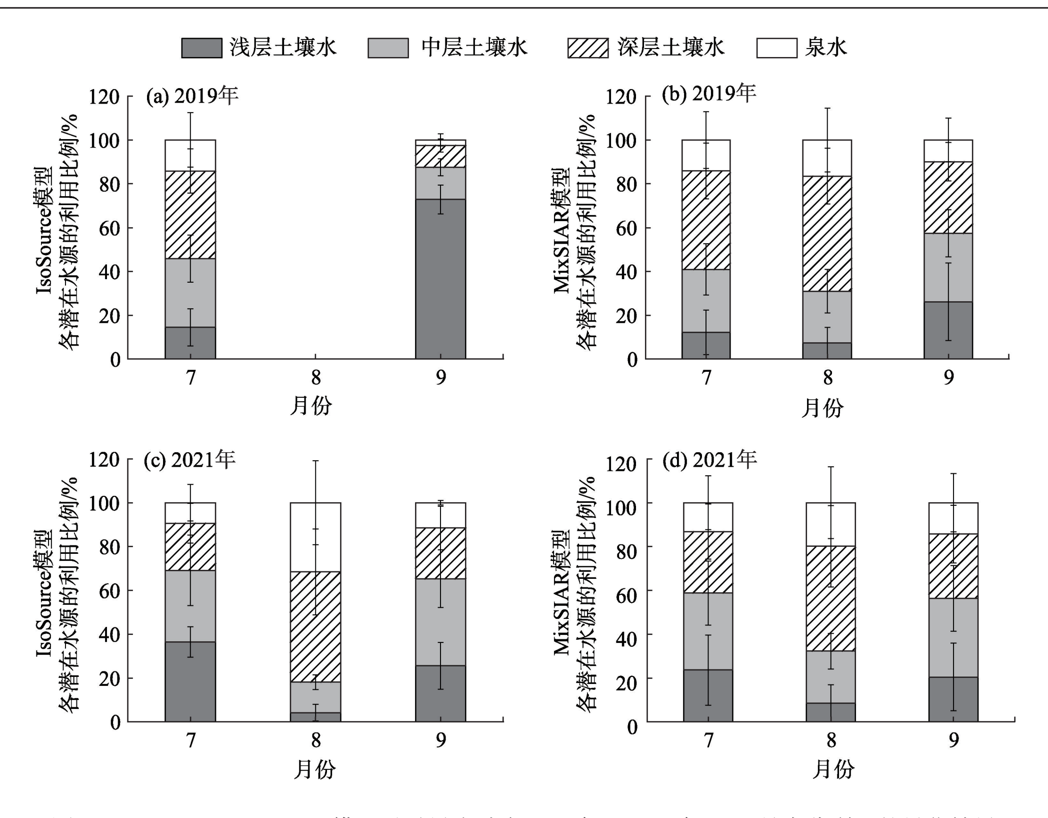


图6 IsoSource和MixSIAR模型对异果小檗在2019年和2021年7—9月水分利用的量化结果

Fig. 6 Quantitative results of IsoSource and MixSIAR models on water use of *Berberis heteropoda* in July-September of 2019 and 2021

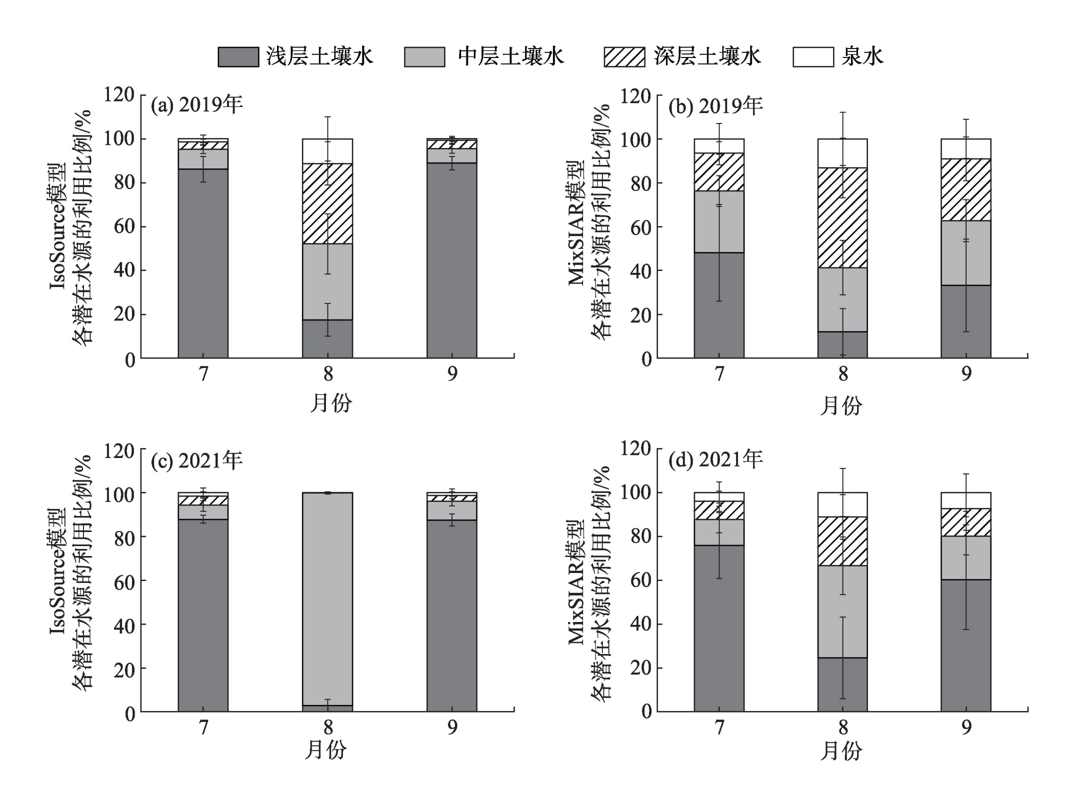


图7 IsoSource和MixSIAR模型对黑果栒子在2019年和2021年7—9月水分利用的量化结果

Fig. 7 Quantitative results of IsoSource and MixSIAR models on water use of *Cotoneaster melanocarpus* in July-September of 2019 and 2021

ChinaXiv合作期刊

表2 MixSIAR和IsoSource模型量化植物水分来源结果

Tab. 2 Quantitative results of plant water sources by MixSIAR and IsoSource models

	2019年				2021年			
	MixSIAR模型		IsoSource模型		MixSIAR模型		IsoSource模型	
	RMSE	*R*	RMSE	*R*	RMSE	*R*	RMSE	*R*
7月	0.6325	0.0124	0.0051	0.0028	0.9721	0.0239	0.3066	0.0033
8月	1.5287	0.0602	0.0106	0.0317	1.2175	0.0554	0.0051	0.0158
9月	1.5851	0.0602	0.0007	0.0032	1.5553	0.0726	0.6115	0.0087

生态位,合理利用有限的水源[17]。与之相似,已有诸多研究报道我国西北干旱区荒漠生态系统旱生灌木梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和白梭梭(*Haloxylon persicum*)也是通过不同的根系功能特征(如二态型根系)有效利用干旱区有限的水源[28-31]。对荒漠灌木而言,其主要依靠降水补充的浅层土壤水,或分布于深层土壤的土壤水和地下水,荒漠生态系统的灌木根系所具备的二态性使其能充分利用荒漠中仅有的水源,维持自身生长[17];然而,天山北坡森林生态系统供植物生长的水分来源较荒漠生态系统相对更充足,但天山森林生态系统由于其特定的山地地质结构特征,其土层厚度相对较薄,植物在垂直方向上的水分吸收范围在一定程度上深受限制,存在一定的水分竞争压力。对于天山北坡林区山前灌木带不同灌木而言,不同的根系功能特征能充分利用岩石层以上有限的水分资源,这对于减缓水分竞争压力起到积极作用[17]。可见,不同生态系统,不同植物水分利用关系表面看似相似,但其背后反映的均是植物长期在不同生境下不断发展、变化,最终形成独特的适应生态系统的最优水分利用策略。

3.2 两种模型量化结果的对比分析

两种模型计算出黑果枸子在研究期的主要潜在水源均一致,而计算出异果小檗的主要潜在水源在个别月份存在差异,如2019年8月、9月以及2021年7月。2019年8月,IsoSource模型未能计算出异果小檗的水源,而MixSIAR模型计算得到异果小檗2019年8月主要吸收深层土壤水,且对其他土层水源也有一定利用比例,两种模型的计算结果不同。借助直接对比法结果看出,2019年8月异果小檗木质部水δ^{18}O值与各土层土壤水δ^{18}O值均无交点(图5),且小于各土层土壤水δ^{18}O值,结合异果小檗深根性树种的特性[32]、天山北坡中段2019年8月0~100 cm土层土壤含水量均较低(图3),故推测该时段异果小檗的主要潜在水源层可能在100 cm以下土层[17]。IsoSource模型和MixSIAR模型对植物水分利用比例定量分析的结果不一致,与两种模型的计算原理有关。IsoSource模型计算原理是先穷举出植物水分来源的所有可能概率,如果植物氢氧同位素组成超出水源氢氧同位素组成范围,则无法计算出结果[6]。而MixSIAR模型计算得出此阶段异果小檗主要潜在水源为深层土壤水,与MixSIAR模型具有先验信息整合功能有关[11-12],根据研究结果来看,可能此功能对植物水源量化结果同样会产生一定误差。

在两种模型对两种植物水源的量化结果主要潜在水源一致的情况下,IsoSource模型计算得到植物对主要潜在水源的利用比例略大于MixSIAR模型(图6,图7)。产生这一结果的原因是,在计算植物用水来源时,IsoSource模型没有考虑植物木质部水和潜在水源的氢氧同位素组成的空间差异,即IsoSource模型可能会将氢氧同位素组成来源完全不同,但氢氧同位素组成相似的水源归为同一水源,最终导致其量化结果的数值偏大[12]。

根据RMSE和参数*R*对MixSIAR模型和IsoSource模型的评判结果均显示天山北坡中段IsoSource模型计算结果优于MixSIAR模型。这与曾祥明等[11]在西南喀斯特地区对MixSIAR模型和IsoSource模型量化植物水分利用结果的评判不一致。一方面推测是西南喀斯特地区与天山北坡中段地貌、气候、降水量等环境条件差异较大,环境条件差异可能是造成模型的适用性不同。天山北坡中段属于西北干旱区,夏季炎热干旱,冬季寒冷多风[33],土壤冻结期较长,一般从当年11月初到次年4月底,长达6个月之久[34],天山北坡中段春季土壤水主要来源于融雪补给,降水月份分布差异较大,降水同位素组成呈明显的季节变化,表现为春冬季贫化

chinaXiv:202303.10342v1

ChinaXiv合作期刊

夏季富集(图1)[17],而喀斯特属于亚热带季风湿润气候,降雨量大,降水同位素特征表现为春季富集夏季贫化[11]。天山北坡中段夏季土壤水同位素表现为浅层富集,随土壤深度增加趋于贫化(图4),而喀斯特区域夏季土壤水同位素特征表现为表层贫化深层富集的特点。不同的降水和土壤等环境条件可能对不同模型的适用性有一定影响。另一方面曾祥明等[11]以刺楸(*Kalopanax septemlobus*)、香椿(*Toona sinensis*)和化香(*Platycarya strobilacea*)为研究对象,根据其研究显示,3种植物的水分来源极为相似,因此,推测MixSIAR模型在量化不同植物水分来源相似度较高的情况下更为适用。而本研究两种植物水分来源差异较大,可能使得IsoSource模型的RMSE和R值相对较低。

综合而言,IsoSource和MixSIAR模型量化植物主要潜在水源结果较为可靠,但各模型均有优缺点,并且针对不同植物选择量化水源模型时,可以优先判断不同植物水源的相似性程度,从而择优选择模型计算。本研究仅对IsoSource和MixSIAR两种模型在天山北坡中段对植物水分来源计算的结果进行对比分析,而其他模型对天山北坡中段植物水分来源的量化结果未知,建议今后可以增加多种模型对该区域植物水分来源的量化,对其结果进行对比分析,得到该区域量化植物水分来源的最优模型,提高植物水分利用计算结果的精确度,更好的为预测未来气候变化对不同生态系统的影响提供更为可靠的基础理论支撑。

4 结 论

天山北坡中段黑果栒子和异果小檗夏季主要潜在利用水源不一致,二者水分利用竞争压力较小。通过MixSIAR和IsoSource模型对两种植物水分利用量化结果的对比分析,两模型的量化结果有所差异,主要与两模型的计算原理有关,IsoSource模型没有考虑植物木质部水和潜在水源的氢氧同位素组成的空间异质性,导致定量结果数值偏大;而MixSIAR模型由于其先验信息整合的功能其量化结果也存在一定误差。模型评判参数RMSE值和参数R值结果均表明IsoSource模型对黑果栒子和异果小檗水分利用计算结果的误差小于MixSIAR模型。建议天山北坡中段今后在量化植物水源时,可以根据不同植物水源的相似性程度选择不同的模型,针对MixSIAR和IsoSource两种模型而言,植物水源差异较大可以选择IsoSource模型,相似度较高建议选择MixSIAR模型。本研究结果为今后研究植物水分利用模型选取提供一定参考依据。

参考文献(References):

[1] Duan D, Ouyang H, Song M, et al. Water sources of dominant species in three alpine ecosystems on the Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2008, 50(3): 257–264.

[2] 朱林, 祁亚淑, 许兴. 宁夏盐池不同坡位旱地紫苜蓿水分来源[J]. 植物生态学报, 2014, 38(11): 1226–1240. [Zhu Lin, Qi Yashu, Xu Xing. Water sources of *Medicago sativa* grown in different slope positions in Yanchi County of Ningxia[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(11): 1226–1240.]

[3] 刘树宝, 陈亚宁, 陈亚鹏, 等. 基于稳定同位素技术的黑河下游不同林龄胡杨的吸水深度研究[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 729–739. [Liu Shubao, Chen Yaning, Chen Yapeng, et al. Study on the depth of water uptake by *Populus euphratica* trees of different ages in the lower reaches of the Heihe River, based on the stable isotope techniques[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): 729–739.]

[4] 林光辉. 稳定同位素生态学:先进技术推动的生态学新分支[J]. 植物生态学报, 2010, 34(2): 119–122. [Lin Guanghui. Stable isotope ecology: A new branch of ecology resulted from technology advances[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(2): 119–122.]

[5] 徐庆, 冀春雷, 王海英, 等. 氢氧碳稳定同位素在植物水分利用策略研究中的应用[J]. 世界林业研究, 2009, 22(4): 41–46. [Xu Qing, Ji Chunlei, Wang Haiying, et al. Use of stable isotopes of hydrogen, oxygen and carbon to identify water use strategy by plant[J]. World Forestry Research, 2009, 22(4): 41–46.]

[6] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources[J]. Oecologia, 2003, 136(2): 261–269.

[7] Stock B C. MixSIAR GUI User Manual, version 1.0[OL]. http: // conserver. iugo-cafe.org/user/brice.semmens, 2013.

[8] Moore J W, Semmens B X. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models[J]. Ecology Letters, 2008, 11(5): 470–480.

[9] Parnell A C, Inger R, Bearhop S, et al. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too much variation[J]. Plos One, 2010, 5(3): e9672.

[10] Romero-saltos H, Sternberg L D S, Moreira M Z, et al. Rainfall exclusion in an eastern Amazonian forest alters soil water movement and depth of water uptake[J]. American Journal of Botany, 2005, 92(3): 443–455.

[11] 曾祥明, 徐宪立, 钟飞霞, 等. MixSIAR和IsoSource模型解析植

chinaXiv:202303.10342v1

ChinaXiv合作期刊

物水分来源的比较研究[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5611–5619. [Zeng Xiangming, Xu Xianli, Zhong Feixia, et al. Comparative study of MixSIAR and IsoSource models in the analysis of plant water sources[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5611–5619.]

[12] 张宇, 张明军, 王圣杰, 等. 基于稳定氧同位素确定植物水分来源不同方法的比较[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1356–1368. [Zhang Yu, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Comparison of different methods for determining plant water sources based on stable oxygen isotope[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4): 1356–1368.]

[13] 胡仲豪, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山林区不同类型群落土壤氮素对冻融过程的动态响应[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 571–579. [Hu Zhonghao, Chang Shunli, Zhang Yutao, et al. Dynamic response of soil nitrogen to freeze-thaw processes in different cenotypes in the forests of the Tianshan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 571–579.]

[14] 谢锦, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性[J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4363–4372. [Xie Jin, Chang Shunli, Zhang Yutao, et al. Plant and soil ecological stoichiometry with vertical zonality on the northern slope of the middle Tianshan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(14): 4363–4372.]

[15] 孙雪娇, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山森林植物功能性状与碳库沿海拔梯度的变化[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 4994–5005. [Sun Xuejiao, Chang Shunli, Zhang Yutao, et al. The variations in plant functional traits and forest carbon content with altitudinal gradients in the Tianshan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 4994–5005.]

[16] 李翾然, 常顺利, 张毓涛. 天山雪岭云杉林粗木质残体储量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3730–3739. [Li Xuanran, Chang Shunli, Zhang Yutao. Attributes of coarse woody debris in *Picea schrenkiana* forests of Tianshan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): 3730–3739.]

[17] 古丽哈娜提·波拉提别克, 常顺利, 李红梅, 等. 天山林区4种主要灌木夏季水分来源差异[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 1–11. [Gulihanati Bolatibieke, Chang Shunli, Li Hongmei, et al. Differences in water sources of four main shrubs of Tianshan Mountains in summer[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 1–11.]

[18] 古丽哈娜提·波拉提别克. 天山林区木本植物夏季水分来源差异[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021. [Gulihanati Bolatibieke. Differences in Water Sources of Woody Plants in the Forests of Tianshan Mountains in Summer[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2021.]

[19] 巴贺贾依娜尔·铁木尔别克. 古尔班通古特沙漠南缘共存C_3和C_4灌木水分来源与水分利用策略[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. [Bahejiayinaer Tiemuerbieke. Water Sources and Water Use Strategies of Co-occurring C_3 and C_4 Shrubs in Southern Edge of Gurbantunggut Desert[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.]

[20] Nie Y, Chen H, Wang K, et al. Seasonal water use patterns of woody species growing on the continuous dolostone outcrops and nearby thin soils in subtropical China[J]. Plant and Soil, 2011, 341(1): 399–412.

[21] Liu Z, Yu X, Jia G. Water uptake by coniferous and broad-leaved forest in a rocky mountainous area of northern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 265: 381–389.

[22] Schultz N M, Griffis T J, Lee X, et al. Identification and correction of spectral contamination in $^{2}H/^{1}H$ and $^{18}O/^{16}O$ measured in leaf, stem, and soil water[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2011, 25(21): 3360–3368.

[23] 戴岳. 荒漠建群种梭梭和白梭梭对降水的再分配及其生态意义研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015. [Dai Yue. Precipitation Partitioning and Its Ecological Significance for Desert Dominant Species *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum*[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.]

[24] Li J, Heap A D. A Review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors[J]. Ecological Informatics, 2011, 6(3): 228–241.

[25] Ehleringer J, Dawson T. Water uptake by plants: Perspectives from stable isotope composition[J]. Plant, Cell & Environment, 1992, 15(9): 1073–1082.

[26] Cramer V A, Thorburn P J, Fraser G W. Transpiration and groundwater uptake from farm forest plots of *Casuarina glauca* and *Eucalyptus camaldulensis* in saline areas of southeast Queensland, Australia[J]. Agricultural Water Management, 1999, 39(2): 187–204.

[27] Landwehr J, Coplen T. Line-conditioned Excess: A New Method for Characterizing Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Ratios in Hydrologic Systems[C]//International Conference on Isotopes in Environmental Studies: IAEA Vienna, 2006: 132–135.

[28] 李涛, 彭丽萍, 师庆东, 等. 新疆准噶尔盆地不同径级梭梭和白梭梭的水分来源[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 2099–2110. [Li Tao, Peng Liping, Shi Qingdong, et al. Water sources of *Haloxylon ammodendron* and *H. persicum* of different diameter classes in Junggar Basin, Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 2099–2110.]

[29] 戴岳, 郑新军, 唐立松, 等. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态[J]. 植物生态学报, 2014, 38(11): 1214–1225. [Dai Yue, Zheng Xinjun, Tang Lisong, et al. Dynamics of water usage in *Haloxylon ammodendron* in the southern edge of the Gurbantünggüt Desert[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(11): 1214–1225.]

[30] Dai Y, Zheng X, Tang L, et al. Stable oxygen isotopes reveal distinct water use patterns of two *Haloxylon species* in the Gurbantonggut Desert[J]. Plant and Soil, 2015, 389(1): 73–87.

[31] Tiemuerbieke B, Min X, Zang Y, et al. Water use patterns of co-occurring C_3 and C_4 shrubs in the Gurbantonggut Desert in Northwestern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 634:

chinaXiv:202303.10342v1

ChinaXiv合作期刊

341-354.

[32] 王文栋, 白志强, 阿里木·买买提, 等. 天山林区6种优势种灌木林生物量比较及估测模型[J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2695-2704. [Wang Wendong, Bai Zhiqiang, Alimu Maimaiti, et al. Biomass comparison and estimation models for six dominant species of woody shrubs in the forest zones of the Tianshan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): 2695-2704.]

[33] 徐丽萍, 郭鹏, 刘琳, 等. 天山北坡NDVI对气候因子响应的敏感性分析[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(21): 5116-5120, 5125. [Xu Liping, Guo Peng, Liu Lin, et al. The sensitivity of vegetation index and climate factors in North Tianshan Mountain[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(21): 5116-5120, 5125.]

[34] 陈磊, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山林区土壤总氮矿化过程对季节性冻融的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(12): 3968-3978. [Chen Lei, Chang Shunli, Zhang Yutao, et al. Response of soil gross nitrogen mineralization process to seasonal freeze-thawing in the forests of Tianshan Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 3968-3978.]

Comparative analysis of summer water sources of different shrubs on the northern slope of Tianshan Mountains by MixSIAR and IsoSource models

LI Hongmei[1], Bahejiayinaer TIEMUERBIEKE[2], CHANG Shunli[1],
Gulihanati BOLATIBIEKE[1], ZHANG Yutao[3,4], LI Jimei[3,4]

(1. College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China;
2. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China;
3. Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, Xinjiang, China; 4. Xinjiang Tianshan Forest Ecosystem National Positioning Observation Research Station, Urumqi 830063, Xinjiang, China)

Abstract: This study aims to provide reference for quantifying the selection model of plant water sources. MixSIAR model and IsoSource model are commonly used to quantify plant water sources by combining hydrogen and oxygen stable isotope technology. However, different models yield varying quantitative results. Hence, choosing the best model is important to reduce the uncertainty of results. In this work, the hydrogen and oxygen stable isotope compositions of stem xylem water and each potential water source of two shrubs were measured from July to September in 2019 and 2021. The dominant tree species *Cotoneaster melanocarpus* and *Berberis heteropoda* in the premontane shrub zone of the northern slope of Tianshan Mountain were selected as subjects. MixSIAR and IsoSource models were used to quantify plant water sources, and their results were compared and evaluated according to the root mean square error (RMSE) and parameter *R*. Results showed (1) differences in the quantification results of the two models for the main potential water sources of plants. These differences were related to the calculation principles of the two models. (2) Under the premise that the two models quantify the same main potential water sources of plants, the IsoSource model quantifies larger values than the MixSIAR model. (3) The results of RMSE and parameter *R* showed that the error of IsoSource model in quantifying plant water sources was smaller than that of MixSIAR model possibly due to the large difference between *C. melanocarpus* and *B. heteropoda* In summary, the MixSIAR model may be more accurate in quantifying the similarity of plant water sources than the IsoSource model.

Keywords: hydrogen and oxygen stable isotopes; water sources; MixSIAR model; IsoSource model; the northern slope of Tianshan Mountains

chinaXiv:202303.10342v1